

На правах рукописи



ЭЙСМОНДТ КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО
УСТРОЙСТВ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ПРОКАТА
РЕГУЛИРУЕМЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО ВНИИМТ) и на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научные руководители: – доктор технических наук, профессор
ТЕЛЕГИН Александр Семенович
– Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
ЯРОШЕНКО Юрий Гаврилович

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор
КАБАКОВ Зотей Константинович
Череповецкий государственный университет
– кандидат технических наук,
БЕЛЕНЬКИЙ Борис Зиновьевич,
ОАО «Уральский институт металлов»

Ведущее предприятие – Открытое акционерное общество «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» г. Челябинск

Защита состоится 20 мая 2011 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» в ауд. Мт-329 (зал Ученого совета) по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, корпус 3. Тел./факс: (343) 374-38-84; e-mail: center@cs.vniimt.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Автореферат разослан 15 апреля 2011 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,

Шилов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Стратегией развития металлургической промышленности России на период до 2020 года¹ в качестве основных тенденций развития предусматривается освоение производство широкоформатного проката для толстостенных труб большого диаметра, и повышение качественных характеристик толстолистового проката, производимого для нужд оборонно-промышленного комплекса, судостроения, атомного машиностроения.

При решении задач освоения производства высококачественного толстолистового проката широкое применение находит регулируемое охлаждение, прежде всего при термомеханической обработке. При этом повышение служебных свойств стального проката обеспечивается без увеличения количества дорогостоящих легирующих элементов.

Особенностью современного этапа развития процессов термоупрочнения является широкое применение охлаждающих устройств, устанавливаемых в потоке прокатных станов. Согласно опубликованным данным, по оснащению прокатных станов охлаждающими устройствами Россия значительно отстала от мировых лидеров металлургии. В условиях имеющегося дефицита воды на металлургических предприятиях России и Украины, а так же ограниченности длины отводящих рольгангов действующих прокатных станов, становится актуальной задача обеспечения тепловой экономичности охлаждающих устройств.

Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научно-практической деятельности «Центра новых систем охлаждения и технологии термоупрочнения металлов» (до 2004 г. – лаборатория теплотехники регламентированного охлаждения проката) ОАО «ВНИИМТ» в рамках хоздоговорных работ и контрактов с МК «Азовсталь» (г. Мариуполь, Украина) и ЧерМК – ОАО «Северсталь», а также Государственного контракта с Минобрнауки России по теме № 02.740.11.0152. Согласно им проведены промышленные и стендовые исследования, разработаны технические задания и проектно-конструкторская документация, изготовлено и поставлено оборудование, выполнены пуско-наладочные работы на устройствах для регулируемого охлаждения толстолистового проката и определены их режимные параметры при термоупрочнении реального сортамента обоих предприятий.

Цель работы: разработка режимных и конструктивных параметров устройств регулируемого охлаждения толстолистового проката различного марочного и размерного сортамента для реализации широкого спектра технологических процессов термического упрочнения и внедрение их в условиях действующих предприятий: МК «Азовсталь» и ЧерМК–ОАО «Северсталь».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение технологических и технических требований к устройствам регулируемого охлаждения толстолистового проката с прокатного нагрева (в потоке стана) и после специального нагрева.

¹ Приказ Минпромторга РФ от 18 марта 2009 г. № 150 «Об утверждении стратегии развития металлургической промышленности России на период до 2020 года»

2. Использование результатов численного моделирования процессов теплообмена, протекающих при ускоренном охлаждении толстого листа, для определения параметров устройств ускоренного охлаждения.

3. Разработка раздающих коллекторов с плоскофакельными насадками, обеспечивающих равномерное распределение неразрывных потоков воды по ширине листа в широком диапазоне регулирования расходов, в том числе при работе на оборотной воде прокатного цеха с низким давлением.

4. Внедрение в эксплуатацию промышленных устройств регулируемого охлаждения с прокатного нагрева (в потоке стана) и после специального печного нагрева. Разработка режимов работы охлаждающих устройств, обеспечивающих реализацию различных технологий термоупрочнения.

5. Анализ опыта промышленной эксплуатации АСУ ТП устройства контролируемого охлаждения в потоке стана 5000 ЧерМК-ОАО «Северсталь».

Научная новизна:

1. На основе физического и математического моделирования процессов теплообмена разработаны принципы построения систем регулируемого охлаждения толстолистного проката, позволяющие реализовать в одном агрегате различные технологии термоупрочнения – прерванное ускоренное охлаждение, закалку и закалку с самоотпуском.

2. Разработаны конструкции раздающих коллекторов с плоскофакельными насадками, обеспечивающие высокую равномерность охлаждения по ширине и длине листа, и существенно более высокие, чем в зарубежных агрегатах, пределы регулирования скорости охлаждения – одного из главных параметров для обеспечения высокого уровня механических свойств.

3. Получены теплофизические характеристики устройств в виде зависимости плотности теплового потока q от плотности орошения W ($q=f(W)$), на основании которых проведена адаптация математической модели для каждого конкретного агрегата с последующим определением оптимальных режимов работы устройств для термоупрочнения проката промышленного сортамента. Получены данные о высокой равномерности охлаждения по ширине и длине толстолистного проката (штрипса) для труб большого диаметра, удовлетворяющей требованиям международных стандартов.

Достоверность полученных результатов диссертации обеспечивается использованием апробированных и контролируемых методик исследования в производственных и стендовых условиях, статистической обработкой экспериментальных и расчетных данных, воспроизводимостью полученных результатов и непротиворечивостью их литературным данным.

Практическая значимость. Разработаны и внедрены в промышленную эксплуатацию устройства ускоренного охлаждения за нормализационными печами в потоке стана 3600 МК «Азовсталь» и устройство контролируемого охлаждения в потоке стана 5000 ЧерМК-ОАО «Северсталь». Разработаны оптимальные с теплофизической точки зрения режимы охлаждения толстолистного проката в данных устройствах термоупрочнения. Разработана и реализована система управления УКО стана 5000, обеспечивающая в режиме реального времени достижение высоких показателей качества толстолистного проката

различного назначения, включая магистральные трубы большого диаметра и судосталь. Математическая модель ускоренного охлаждения, разработанная во ВНИИМТ и реализованная в АСУ ТП для выбора и управления режимами термоупрочнения листов различного марочного и размерного сортамента, обеспечивает получение температуры конца охлаждения с отклонением от заданной не более 3%.

На защиту выносятся:

1. Комплекс требований к устройствам регулируемого охлаждения толстолистового проката и особенности функционирования АСУ ТП многосекционных устройств ускоренного охлаждения.

2. Теплофизические особенности организации процесса термоупрочнения толстолистового проката с постоянной и переменной во времени интенсивностью охлаждения, обеспечивающего заданные технологические ограничения.

3. Конструкции раздающих коллекторов с плоскофакельными насадками, обеспечивающие равномерную раздачу воды, в том числе «грязного» оборотного цикла низкого давления (до 0,04 МПа), определяющие геометрические размеры плоскофакельных насадков и величина расходного коэффициента коллектора μ .

4. Определяющие теплофизические зависимости плотности теплового потока q от плотности орошения W ($q=f(W)$) для разработанных и внедренных в промышленную эксплуатацию устройств.

5. Результаты комплексного исследования равномерности охлаждения толстолистового проката для труб большого диаметра.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на: 9-й научно-технической конференции молодых специалистов и ученых Урала «Проблемы теплотехники металлургических процессов и агрегатов», Свердловск, г.; II Всесоюзной научно-технической конференции «Повышение качества металлопроката путем термической и термомеханической обработки», Днепропетровск, 1985 г.; семинаре «Современное оборудование и технология термической и химико-термической обработки металлических материалов», Москва, МДНТП, 1986 г.; конференции «Проблемы качества и совершенствования оборудования тяжелого, энергетического, транспортного и химического машиностроения», Свердловск, НИИТяжМаш, 1986 г.; 10-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Урала «Проблемы теплотехники металлургических процессов и агрегатов», Свердловск, 1987 г.; Всесоюзной научно-технической конференции молодых металлургов-исследователей «Проблемы повышения технического уровня производства черных металлов и сплавов», Донецк, 1987 г.; Всесоюзном научно-техническом семинаре «Совершенствование технологии производства толстолистового проката с целью повышения качества готовой продукции», Донецк, 1987 г.; XI научно-технической конференции молодых ученых «Проблемы теплотехники металлургических процессов и агрегатов», Свердловск, 1988 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Повышение качества металлопроката путем термической и термомеханической обработки», Днепропетровск, 1988 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Теплотехническое обеспечение

технологических процессов металлургии», Свердловск, 1990 г.; II-й научно-технической конференции «Штрипс и трубы – обеспечение качества», Нижний Тагил, 2002 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика технологических процессов», РГАТА, Рыбинск, 2005 г.; на международной научно-практической конференции «Топливо-металлургический комплекс» АИН им. А.М. Прохорова, г. Екатеринбург, 2007г. и на VIII международном конгрессе прокатчиков, ММК, г. Магнитогорск, 2010 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 научных работ, из них: 8 статей в рецензируемых журналах по перечню ВАК, 8 статей в других журналах и сборниках научных трудов и докладов всероссийских и международных конференций. По теме диссертации получено авторское свидетельство и патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 170 страницах, содержит 72 рисунка, 31 таблицу, 2 приложения и библиографический список из 216 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, обоснована цель работы, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен аналитический обзор научно-технической литературы, касающейся вопросов термоупрочнения толстолистового проката, особенностей теплообмена при струйном водяном охлаждении и действующих устройств регулируемого охлаждения толстого листа.

Проанализированы современные способы упрочнения толстого широкополосного проката, который находит широкое применение для изготовления магистральных трубопроводов и емкостей для хранения нефтепродуктов и газов, включая сжиженные, а также в судо- и мостостроении и других отраслях промышленности. Требования по прочности и вязкости толстолистового проката постоянно повышаются при одновременном снижении металлоемкости изделий, что видно на примере труб большого диаметра, используемых при строительстве магистральных газо- и нефтепроводов.

Отмечено, что быстрое охлаждение изделий, сопровождаемое структурными превращениями в металле, в условиях неравномерного распределения интенсивности теплоотвода приводит к возникновению термических и структурных напряжений, которые, в свою очередь, могут вызвать деформацию проката.

В условиях ускоренного охлаждения особым своеобразием отличается протекание кризисов теплообмена при кипении воды. В связи с особенностями гидродинамических процессов и существованием кризисов теплообмена в местах натека струй интенсивность теплообмена может достигать величины 10...30 МВт/м², тогда как на периферийных участках между струями интенсивность теплообмена ниже на порядок и более. Теплофизические процессы, про-

текающие в охлаждающих устройствах, существенно отличаются от процессов, протекающих при нагреве и кипении жидкостей в теплоэнергетических агрегатах, в частности вследствие резко выраженной их нестационарности, поскольку данные процессы протекают за несколько секунд или даже за доли секунды. Это не позволяет в полной мере использовать при разработке охлаждающих устройств методы теплового расчета, разработанные в энергетике.

Приведен сравнительный анализ действующих в мире и России устройств ускоренного контролируемого охлаждения в потоке толстолистовых прокатных станов и роликовых закалочных машин. Отмечено, что большинство из них имеют весьма ограниченную область применения, большую протяженность и очень высокий расход воды, для обеспечения которого требуется многоступенчатая система глубокой очистки.

На основании анализа приведённых в литературе данных сформулированы задачи исследования.

Во второй главе сформулирован комплекс технологических и технических требований к устройствам регулируемого охлаждения толстого листа.

На основе опыта работ, проведённых во ВНИИМТ по изучению и совершенствованию режимных и конструктивных параметров устройств ускоренного охлаждения толстолистового проката на металлургических предприятиях СССР, обобщения данных по зарубежным охлаждающим устройствам сформулированы основополагающие требования, предъявляемые к разрабатываемым и реконструируемым устройствам регулируемого охлаждения.

В процессе регулируемого охлаждения для реализации заданной технологии термоупрочнения и требуемой планшетности толстолистового проката необходимо обеспечить требуемую траекторию охлаждения (скорость охлаждения) металла в заданных температурных интервалах, симметричность охлаждения верхней и нижней поверхностей и минимальный перепад температур по толщине в момент завершения ускоренного охлаждения.

В третьей главе описана методика численного моделирования процесса ускоренного охлаждения, приведено описание математической модели, описана методика проведения и обработки результатов промышленных экспериментов.

Показана целесообразность применения усреднённых теплофизических характеристик секций при анализе теплообменных процессов при ускоренном охлаждении, которые, в свою очередь, можно связать с конструктивными и режимными параметрами секций охлаждающего устройства.

Для обоснования режимных и конструктивных параметров устройств термоупрочнения толстого листа с прокатного и специального нагрева при проведении пуско-наладочных работ и определении режимов охлаждения в процессе освоения технологии термоупрочнения конкретных видов продукции использована математическая модель, ранее разработанная во ВНИИМТе, адаптированная автором к анализу теплофизических задач, рассматриваемых в диссертации. В соответствии с этой моделью температурное состояние толстого

листа в процессе охлаждения в общем случае определяется посредством решения одномерного уравнения теплопроводности для неограниченной пластины в граничных условиях 2-го рода (при $t_n \geq 100^\circ\text{C}$) и 3-го рода (при $t_n < 100^\circ\text{C}$):

$$c(t)\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где $c(t)$ - теплоемкость при температуре t , Дж/(кг·град); ρ - плотность металла, кг/м³; t - температура, °C; τ - время, с; x - расстояние от поверхности, м; $\lambda(t)$ - коэффициент теплопроводности при температуре t , Вт/(м·град) с начальными условиями:

$$t(x, 0) = f(x) \quad (2)$$

и граничными условиями:

- при ускоренном охлаждении в УКО:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \bigg|_{x=\pm \frac{\delta}{2}} = \begin{cases} q_i \text{ при } t_n \geq 100^\circ\text{C} \\ \alpha_i \times (t_n - t_{o.c.}) \text{ при } t_n < 100^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (3)$$

где δ - толщина листа, м; q - плотность теплового потока на поверхности листа, Вт/м²; t_n - температура поверхности листа, °C; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град); $t_{o.c.}$ - температура окружающей среды, °C

$$\alpha_i = \frac{q_i}{t_{n.k} - t_{o.c.}} \quad (4)$$

- при естественном охлаждении на воздухе:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \bigg|_{x=\pm \frac{\delta}{2}} = \alpha_\Sigma \times (t_n - t_{o.c.}) \quad (5)$$

Суммарный коэффициент теплообмена α_Σ при охлаждении в интервале температур $t_{n.охл} - t_{изм}$ или $t_{к.охл} - t_{изм}$:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_\lambda + \alpha_\kappa \quad (6)$$

Особенностью данной расчетной методики является то, что граничные условия задаются отдельно для верхней и нижней поверхностей листа через зависимость:

$$q_{vi} = f(W_{vi}) \text{ для } x = \delta/2 \text{ и } q_{ni} = f(W_{ni}) \text{ для } x = -\delta/2, \quad (7)$$

где W - плотность орошения, м³/(м² ч).

Плотность орошения (удельный расход воды на 1 м² поверхности листа) определяется по зависимостям:

$$W_{\text{vi}} = \frac{Q_{\text{vi}}}{S_i \cdot L_i} \quad (8)$$

$$W_{\text{ni}} = \frac{Q_{\text{ni}}}{S_i \cdot L_i}, \quad (9)$$

где Q_{vi} , Q_{ni} – соответственно расход воды на верх, низ i – той секции;
 S_i и L_i – ширина и длина i – той секции, м.

Зависимости вида $q=f(W)$ связывают характеристики теплообмена в секции устройства с контролируемыми параметрами, учитывают гидродинамические и теплообменные процессы на высоконагретой поверхности, сглаживая локальные неоднородности в пределах секции. На основании данных зависимостей, определяемых экспериментально, производится адаптация математической модели для каждого конкретного охлаждающего устройства.

При обработке результатов промышленных экспериментов средняя за период охлаждения одного раската плотность теплового потока, отведенного от конкретного листа в охлаждающем устройстве, определялась по балансовой зависимости:

$$\bar{q} = (c_{\text{н.охл}} t_{\text{м.н.охл}} - c_{\text{к.охл}} t_{\text{м.к.охл}}) \frac{\rho \delta}{\tau_{\text{охл}}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{м.н.охл}}$, $t_{\text{м.к.охл}}$ – средние по массе температуры начала и конца охлаждения, °С; $c_{\text{н.охл}}$, $c_{\text{к.охл}}$ – средняя теплоемкость металла при значениях температуры $t_{\text{м.н.охл}}$, $t_{\text{м.к.охл}}$, Дж/кг·град.

При включении нескольких секций с различным расходом (плотностью орошения) на каждую принималось, что средний тепловой поток составляет:

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ci} W_{ci}}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (11)$$

Описана методика проведения промышленных экспериментов.

В четвертой главе приведены результаты работ по созданию и внедрению устройств ускоренного охлаждения после специального нагрева на участке термообработки в потоке стана 3600 МК «Азовсталь». В начале 80-х годов перед комбинатом «Азовсталь» остро стояла проблема повышения уровня прочностных свойств листов, подвергнутых нормализации с тёплого посада, так как для ряда партий конструкционного проката не обеспечивались требования ГОСТа. Такой металл приходилось подвергать повторной термообработке со специального нагрева с ускоренным охлаждением в закалочной машине, что значительно повышало себестоимость производства.

На участке термообработки в потоке стана 3600 МК «Азовсталь» расположены три роликовые проходные печи, предназначенные для нагрева с тёплого посада листов толщиной 10...50 мм. В состав участка входили душирующие устройства конструкции концерна «Skoda», которые не удалось ввести в эксплуатации ввиду сильного коробления листов.

При участии автора путём численного моделирования процессов термоупрочнения проведен анализ закономерностей ускоренного охлаждения в диапазоне среднемассовых температур 930...600 °С листов толщиной 10...50 мм из углеродистых и низколегированных сталей. Для задания граничных условий в математической модели, описанной в главе 3, использованы данные по теплообмену, полученные с участием автора при исследовании роликовых закалочных машин.

Установлено (рисунок 1), что для листов толщиной 10...25 мм варьируя интенсивность внешнего теплообмена можно в широких пределах изменять скорость охлаждения по всему сечению листа. Для листов толщиной более 25 мм (рисунок 2) увеличение интенсивности внешнего теплообмена приводит к увеличению средней скорости охлаждения (рисунок 3) за счет поверхностных слоев глубиной 6... 10 мм, а для срединных слоев (рисунок 4) скорость охлаждения меняется слабо.

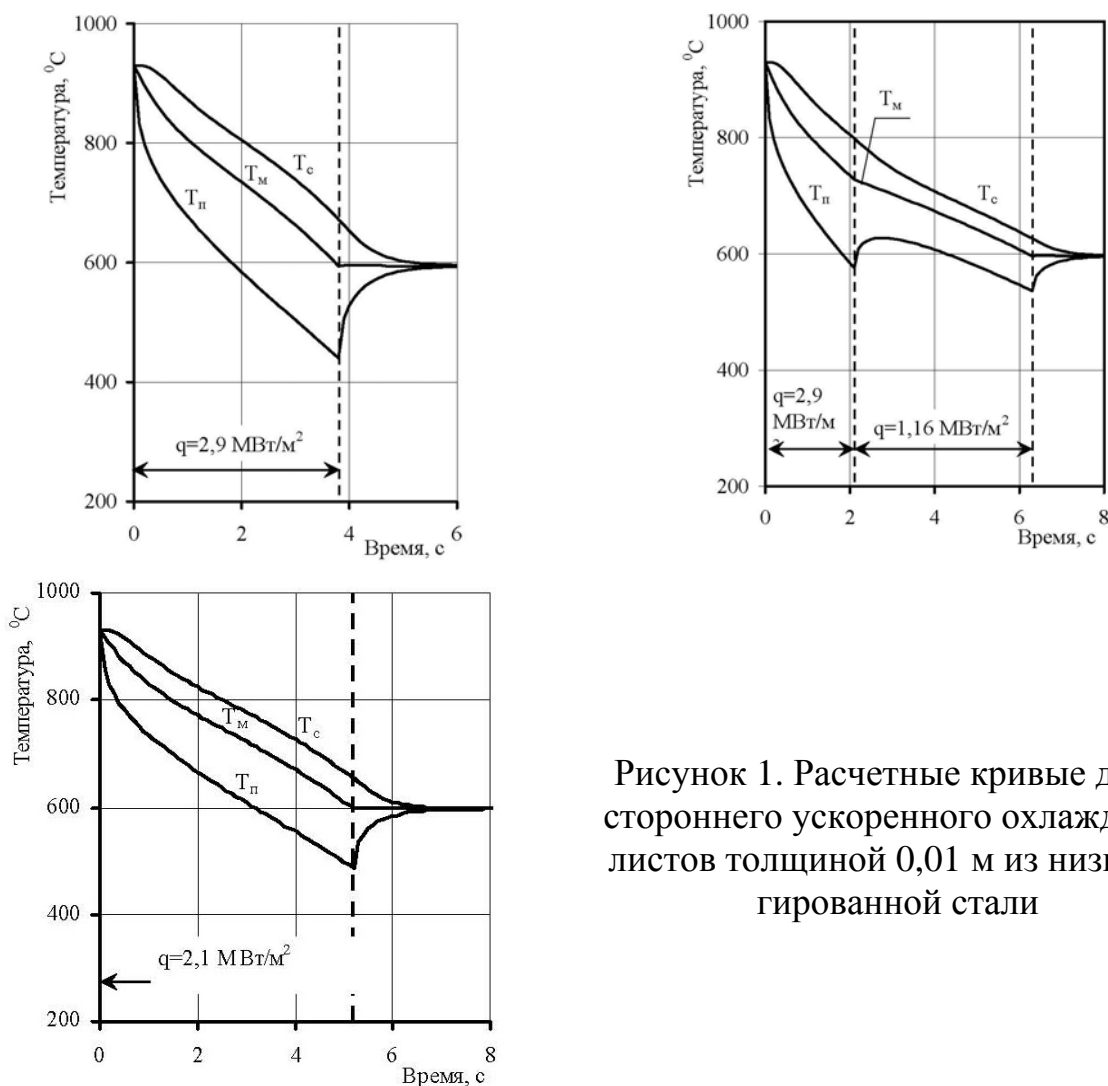


Рисунок 1. Расчетные кривые двух-стороннего ускоренного охлаждения листов толщиной 0,01 м из низколегированной стали

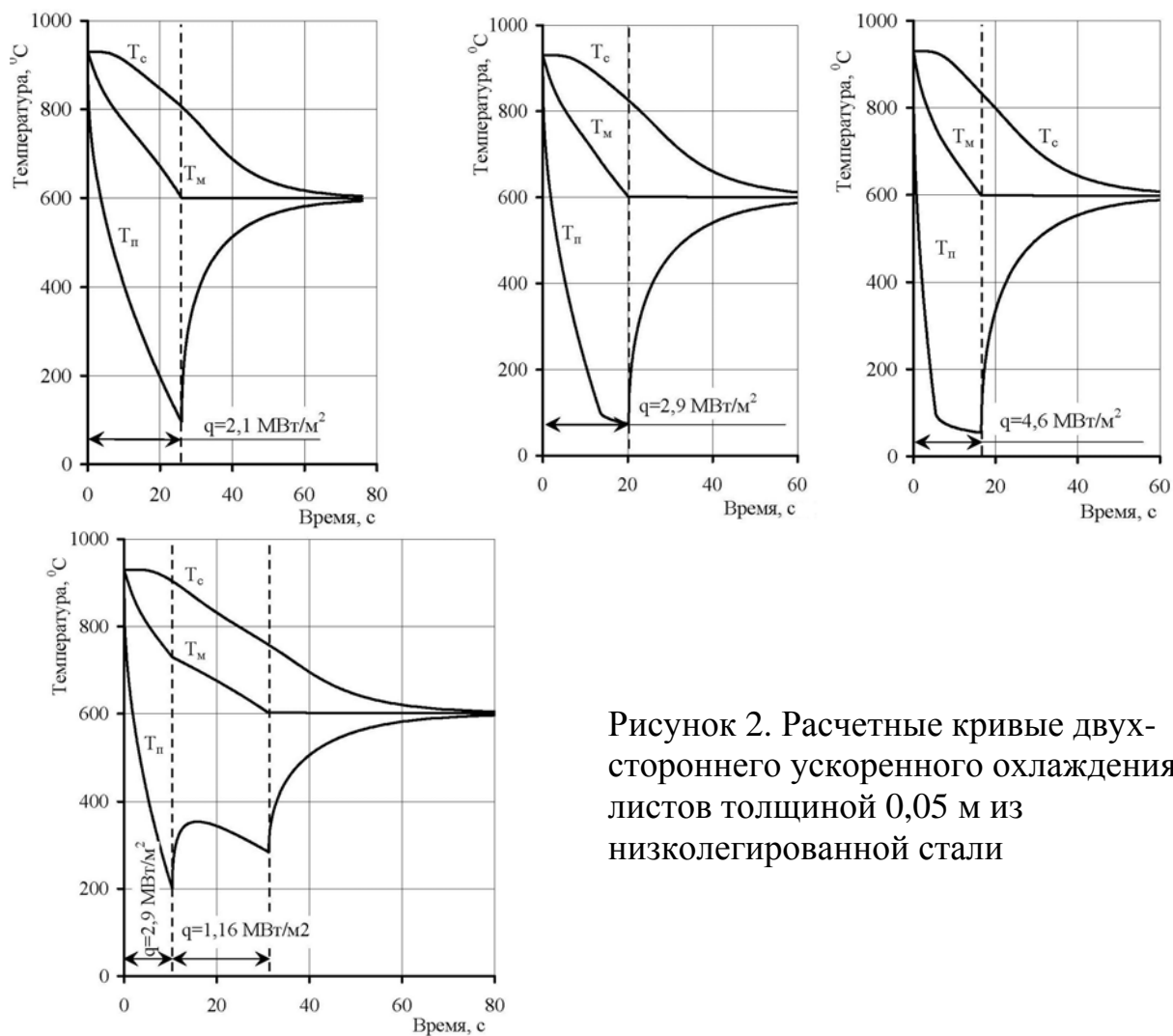


Рисунок 2. Расчетные кривые двух-стороннего ускоренного охлаждения листов толщиной 0,05 м из низколегированной стали

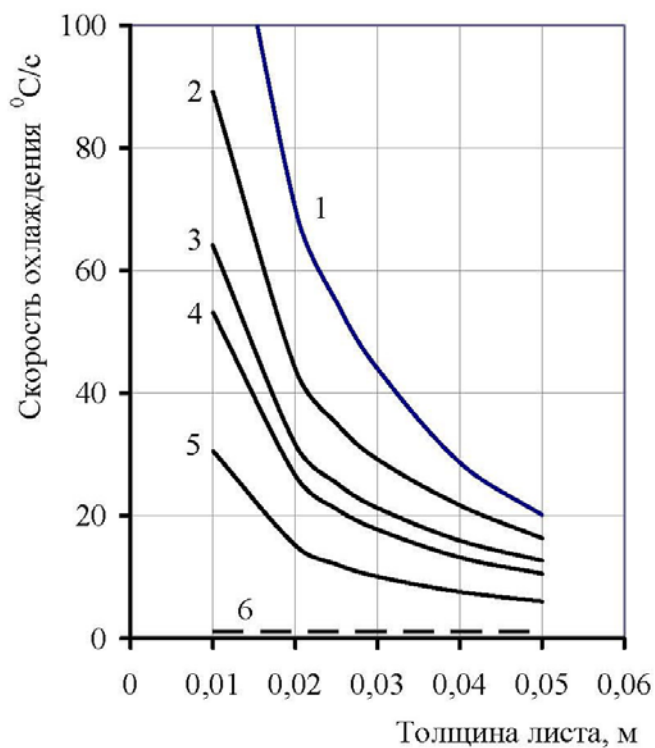


Рисунок 3. Среднемассовая скорость охлаждения листов при ускоренном охлаждении от 930 °С до среднемассовой температуры 600 °С

- 1- $q = 4,6 \text{ МВт/м}^2$;
- 2- $q = 2,9 \text{ МВт/м}^2$;
- 3- $q = 2,1 \text{ МВт/м}^2$;
- 4 - $q = 2,9 \text{ МВт/м}^2$ – I секция,
 $q = 1,16 \text{ МВт/м}^2$ - II-III секции
- 5 - $q = 1,0 \text{ МВт/м}^2$;
- 6 – охлаждение на воздухе

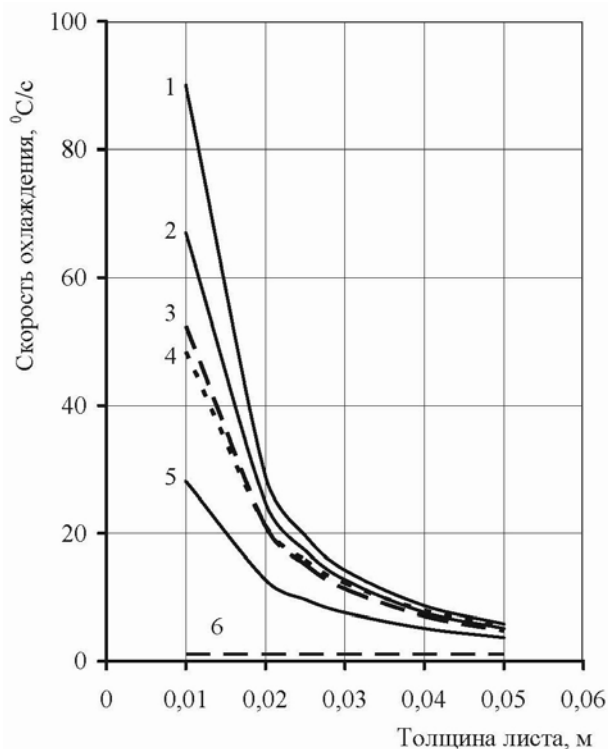


Рисунок 4. Скорость охлаждения середины листа при ускоренном охлаждении от 930°C до среднемассовой температуры 600°C

- 1 - $q = 4,6 \text{ МВт/м}^2$;
- 2 - $q = 2,9 \text{ МВт/м}^2$;
- 3 - $q = 2,1 \text{ МВт/м}^2$;
- 4 - $q = 2,9 \text{ МВт/м}^2$ – I секция,
 $q = 1,16 \text{ МВт/м}^2$ – II-III секции;
- 5 - $q = 1,0 \text{ МВт/м}^2$;
- 6 - охлаждение на воздухе

Рассчитаны рациональные режимы устройств, обеспечивающие прерванное охлаждение до среднемассовой температуры 600°C толстых стальных листов после нагрева под аустенизацию (рисунок 5). Охлаждение с высокой интенсивностью вначале и с пониженной в конце позволяет обеспечить достаточно высокую скорость охлаждения и уменьшить конечный перепад температур по толщине листа.

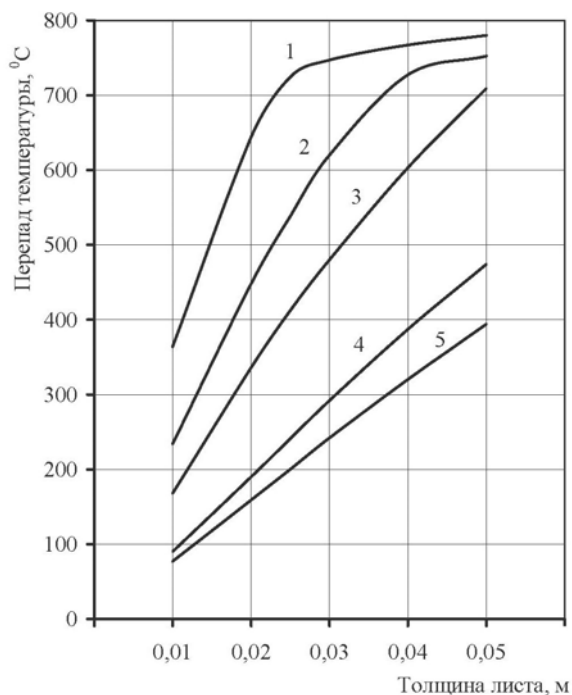


Рисунок 6. Перепад температуры между серединой и поверхностью листа при ускоренном охлаждении от 930°C до среднемассовой температуры 600°C

- 1 - $q = 4,6 \text{ МВт/м}^2$;
- 2 - $q = 2,9 \text{ МВт/м}^2$;
- 3 - $q = 2,1 \text{ МВт/м}^2$;
- 4 - $q = 2,9 \text{ МВт/м}^2$ – I секция,
 $q = 1,16 \text{ МВт/м}^2$ – II- III секции;
- 5 - $q = 1,0 \text{ МВт/м}^2$

На основании результатов моделирования принята концепция секционированного устройства ускоренного охлаждения с переменной интенсивностью охлаждения, обеспечивающая получение необходимой структуры металла пу-

тем сочетания заданной динамики температур (скорости охлаждения) с минимизированным перепадом температуры по сечению листа.

По результатам численного моделирования установлена требуемая длительность охлаждения, длина и количество секций, расходы воды как в целом на устройство, так и на каждую секцию (таблица 1). Автором разработана конструкторская документация и введено в промышленную эксплуатацию устройство для термоупрочнения со специального нагрева толстых стальных листов в незажатом положении за печью № 2 (рисунок 6).

Таблица 1 Основные параметры секций устройства ускоренного охлаждения за нормализационной печью МК «Азовсталь»

№ сек.	В, м	L, м	Q, м ³ /с			W, м ³ /м ² ч	L _{рол} , м	n, шт		L _{кол} , м
			сумма	верх	низ			верх	низ	
1	3,2	2	0,25	0,1	0,15	140	1,0	8	8	0,18
2,3	3,2	2	0,125	0,05	0,075	72	1,0	4	4	0,3
УУО в целом	3,2	6	0,5	0,2	0,3	—	1,0	16	16	—

где № – номера секций; В – ширина зоны орошения, м; L – длина секции, м; n – число коллекторов; Q – расход воды, м³/ч; W – плотность орошения, м³/м² ч; L_{рол} – шаг между роликами, м; n – количество коллекторов в секции; L_{кол} – шаг между коллекторами в межроликовом пространстве; h – расстояние от насадка коллектора до листа, м.

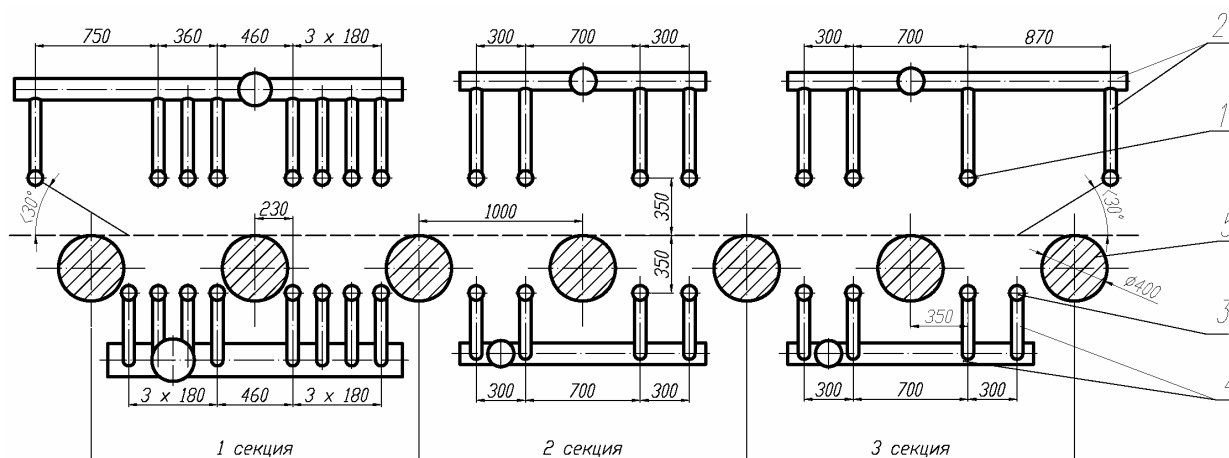


Рисунок 6. Схема устройства ускоренного охлаждения за нормализационной печью № 2

1, 3 – верхние и нижние раздающие коллекторы с плоскофакельными насадками, 2, 4 – подводящие коллекторы верхней и нижней системы охлаждения; 5 – ролики рольганга

С учетом опыта эксплуатации данного устройства было принято решение о совершенствовании конструкции устройств, предназначенных для установки за печами 1 и 3. Основная идея модернизации – разбивка зоны интенсивного охлаждения на две секции (рисунок 7), что значительно улучшило управляемость процессом ускоренного охлаждения. В таблице 2 приведена техническая характеристика устройств.

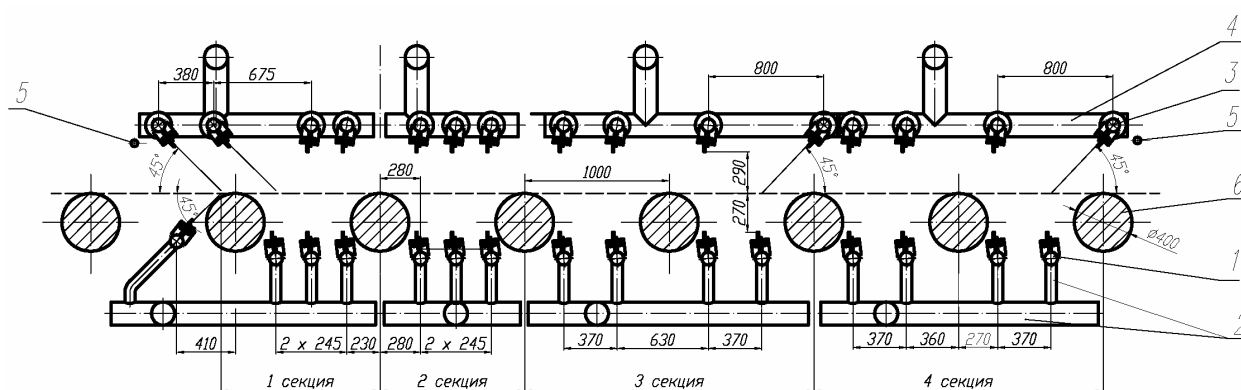


Рисунок 7. Схема устройств ускоренного охлаждения за печами №№ 1, 3

1, 3 – верхние и нижние раздающие коллекторы с плоскофакельными насадками, 2, 4 – подводящие коллекторы верхней и нижней системы охлаждения; 5 – воздушные коллекторы; 6 – ролики рольганга.

Таблица 2 Техническая характеристика устройств ускоренного охлаждения за печами №1 и №3

Параметр		Зона интенсивного охлаждения		Зона пониженной интенсивности		Суммарный общий
№ секции		I	II	III	IV	I...IV
длина, м		1,2	1,0	2,0	2,0	6,2
Р, МПа	верх	0,05	0,05	0,05	0,05	-
	низ	0,05	0,05	0,04	0,04	-
Q, м ³ /ч	верх	180	135	115	115	545
	низ	350	265	230	230	1075
	сумма	530	400	345	345	1620
W, м ³ /м ² ч	верх	40	37	15	15	-
	низ	80	73	30	30	-

На основании стендовых экспериментов для обеспечения работоспособности устройств при использовании «грязной» воды оборотного цикла автором разработана конструкция коллекторов (рисунок 8) на базе успешно зарекомендовавших себя плоскофакельных форсунок ВНИИМТ.

Их конструкция обеспечивает:

- стабильные характеристики факела при работе на оборотной воде высокой загрязненности давлением от 0,02 до 0,12 МПа;
- равномерное распределение воды, как по ширине отдельного факела, так и по всей поверхности широкого листа;
- сохранение неразрывности потока жидкости, в том числе вследствие исключения аэрации, что в свою очередь обеспечивает «пробивание» слоя воды, накопившегося на верхней поверхности листа. Пробившийся поток разрушает паровую плёнку на поверхности металла, интенсифицируя теплообмен.

Определен расходный коэффициент μ коллектора, равный 0,72.

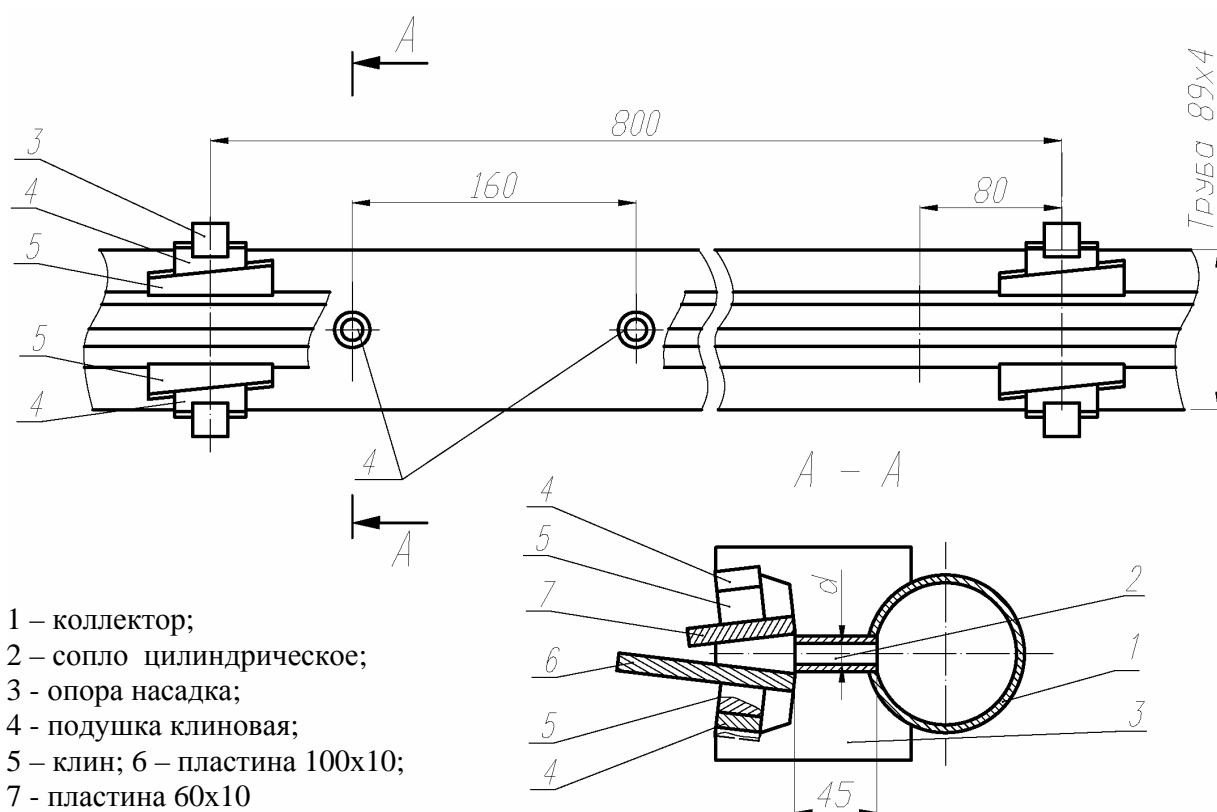


Рисунок 8. Коллектор с плоскофакельными насадками

В устройствах обеспечивается высокая интенсивность и равномерность охлаждения и удовлетворительная планшетность упрочняемых листов при любой степени переохлаждения. Плотность суммарного теплового потока на рабочих режимах в зоне интенсивного охлаждения составляет $3,95 \text{ МВт/м}^2$, в зоне пониженной интенсивности – $1,8 \text{ МВт/м}^2$, что не уступает показателям современных закалочных машин.

По результатам пуско-наладочных работ и последующей эксплуатации автором определены теплофизические характеристики секций устройств, на основании которых проведена адаптации математической модели:

$$q_{\text{в}} = 0,042 + 0,066 W_{\text{в}}, \text{ МВт/м}^2 \quad (12)$$

$$q_{\text{н}} = 0,029 + 0,035 W_{\text{н}}, \text{ МВт/м}^2 \quad (13)$$

Численным моделированием разработаны оптимальные теплофизические режимы работы устройств для термоупрочнения проката промышленного сортамента. Установлен диапазон возможного изменения среднemasовой скорости охлаждения для листов различной толщины - одного из важнейших параметров, характеризующих технологические возможности агрегата. Режимные параметры разработанных устройств позволяют в широком диапазоне регулировать скорости охлаждения в различных температурных интервалах, значительно превышая показатели зарубежных роликовых закалочных машин (рисунок 10). Следовательно, при правильном выборе технологии охлаждения обеспечена возможность получения проката с требуемым комплексом свойств.

Использование разработанных устройств для прерванного охлаждения сталей типа 10...15ХСНД, 14...16Г2АФ согласно исследований, проведённых

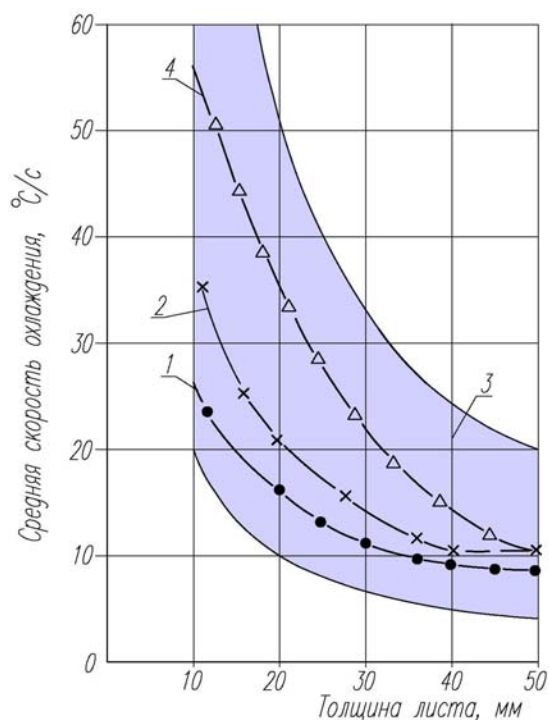


Рисунок 10. Среднемассовые скорости охлаждения листов при обработке в устройствах ускоренного охлаждения

- 1 – устройства за печью № 2 (основной технологический режим);
- 2 – устройства за печами № 1 и 3 (основной технологический режим);
- 3 – область возможного диапазона регулирования скорости охлаждения в устройствах за печами № 1 и 3;
- 4 – Роликовая закалочная машина (DQD) MACS (Япония)²

Институтом черной металлургии, позволило обеспечить для 95% обрабатываемого металла соответствие требованиям ГОСТ по основным показателям – временному сопротивлению, пределу текучести, относительному удлинению и значительный рост показателей ударной вязкости (таблица 3).

Таблица 3 Результаты испытаний механических свойств листов³, поставляемых по ГОСТ 19282-73 «Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная. Технические условия»

Марка стали	Толщина листов, мм	Механические свойства*)				
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	KCU ⁻⁶⁰ , Дж/см ²	KCU ⁻⁴⁰ , Дж/см ²
15ХСНД	10-50	<u>517 – 545</u> 490	<u>362 – 382</u> 345	<u>23,0 – 24,7</u> 21	<u>84 – 105</u> 29	
10ХСНД	10-32	<u>540 – 555</u> 530	<u>400 – 420</u> 390	<u>24,5 – 26,5</u> 19	<u>56 – 114</u> 29	
	34-50	<u>530 – 540</u> 510	<u>395 – 400</u> 390	<u>25,0 – 26,0</u> 19	<u>106 – 117</u> 29	
14Г2АФ	10-50	<u>565 – 600</u> 540	<u>410 – 460</u> 390	<u>21,0 – 23,0</u> 20		<u>52 – 93</u> 39
16Г2АФ	10-32	<u>600 – 620</u> 590	<u>485 – 500</u> 440	<u>20,0 – 22,5</u> 20		<u>56 – 77</u> 39
	34-50	<u>600 – 610</u> 570	<u>465 – 485</u> 410	<u>20,5 – 21,0</u> 20		<u>62 – 85</u> 39

*) – в числителе – результаты сдаточных испытаний, в знаменателе – требования ГОСТ

² Ускоренное охлаждение толстого листа. Сер. «Прокатное производство», вып. 2. М.: Черметинформация, ЦНИИТЭИЧМ. 1984. С. 5...6.

³ Разработка и опытно-промышленная проверка технологии и устройств для ускоренного охлаждения листов за нормализационными печами: Отчет о НИР. Гос. рег. № 01860015642 / Рук. В.Я Савенков. Днепропетровск: ИЧМ, 1987. 88 с.

В пятой главе приведены результаты исследования устройства контролируемого охлаждения в потоке стана 5000 ЧерМК-ОАО «Северсталь».

В 2002 г. в потоке стана 5000 запущено в промышленную эксплуатацию многофункциональное устройство контролируемого охлаждения (далее УКО). Автор принимал участие в освоении устройства, разработке режимов термоупрочнения проката различного марочного и размерного сортамента, проведению исследований по равномерности охлаждения широкоформатного штрипса.

В таблице 4 приведена основная техническая характеристика устройства, на рисунке 11 - схема головных секций устройства, в таблице 5 - параметры секций охлаждения.

Определена единая теплофизическая характеристика секций интенсивного охлаждения и пониженной интенсивности:

$$q_B = 0,08 + 0,054 W_B, \text{ МВт/м}^2 \quad (14)$$

$$q_H = 0,08 + 0,026 W_H, \text{ МВт/м}^2. \quad (15)$$

Таблица 4 Техническая характеристика УКО стана 5000

Размеры раскатов после прокатки	толщина, мм	10...100
	ширина, мм	1500...4800
	длина, м	8...30
Размеры зоны охлаждения	длина, м	21,2
	ширина, м	5,0
Количество секций, шт.		8
Расход воды (общий на УКО), м ³ /ч		до 11800
Номинальное давление воды в коллекторах, МПа		0,10...0,25
Скорость транспортировки раската через устройство, м/с		(0,2...4,5) ±1,5%

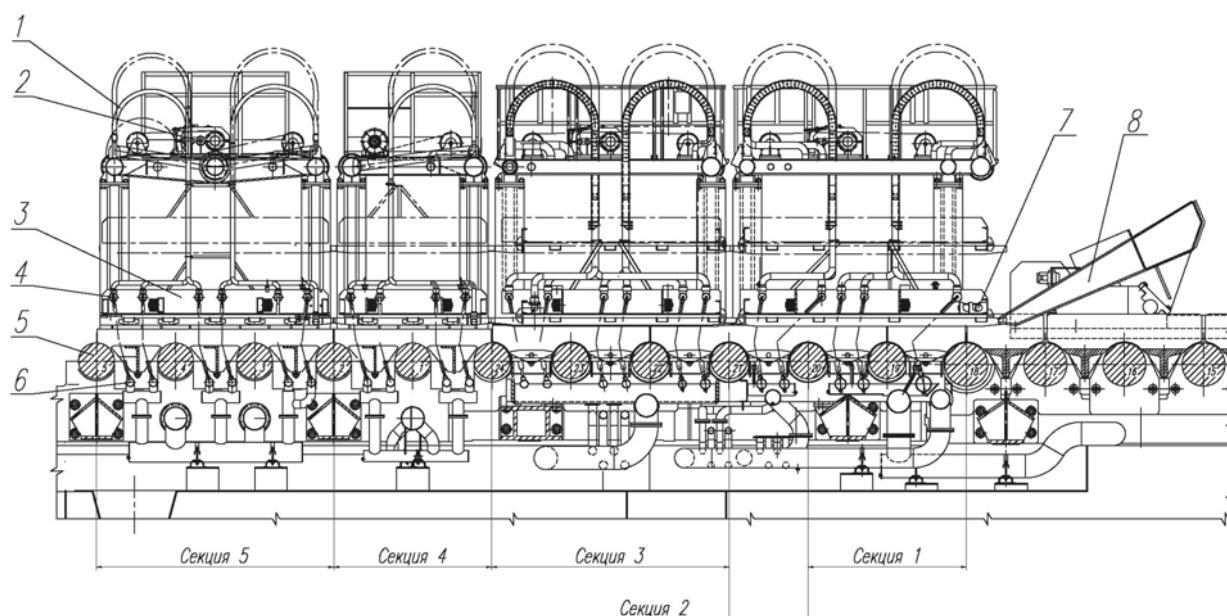


Рисунок 11. Схема общего вида УКО стана 5000 (секции 6...8 не показаны)

1 – гибкий рукав; 2 – привод подъема подвижной рамы; 3 – подвижная рама; 4 – верхние коллекторы; 5 – ролики рольганга; 6 – нижние коллекторы; 7 – воздушный коллектор; 8 – задающая проводка.

Таблица 5 Параметры секций охлаждения

№ секции	Длина, м	Максимальная плотность орошения, м ³ /м ² ч	Расход воды (номинальный), м ³ /ч		
			Общий	Верх центр/края	Низ центр/края
1	1,4	до 300	1760	340/230	715/475
2	1,1	до 200	830	160/110	335/225
3	3,3	до 150	1580	305/205	640/430
4	2,2	до 100	1035	200/135	420/280
5	3,3	до 90	1550	300/200	630/420
6	3,3	до 90	1550	300/200	630/420
7	3,3	до 90	1550	300/200	630/420
8	3,3	до 90	1550	300/200	630/420

На основании полученных зависимостей (14, 15) проведена адаптация математической модели.

Численным моделированием определены и реализованы оптимальные режимные параметры работы устройств для термоупрочнения проката промышленного сортамента. На рисунке 12 приведены данные для скорости изменения среднемассовой температуры раскатов при их охлаждении в УКО (область I). Максимальное значение скорости охлаждения обеспечивается при включении в работу секций зоны интенсивного охлаждения на максимально возможных расходах воды, минимальное - при работе секций зоны пониженной интенсивности с давлением воды в коллекторах ~ 0,1 МПа. При технологической необходимости параметры системы охлаждения позволяют обеспечить еще более низкие скорости охлаждения (область II).

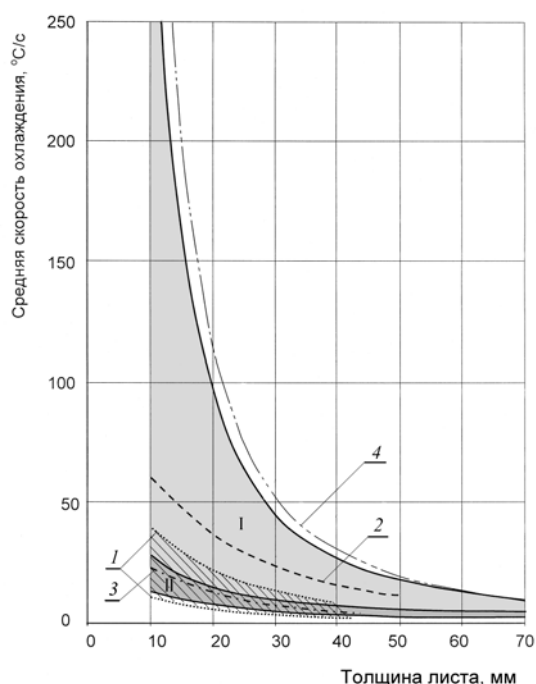


Рисунок 12. Скорость изменения среднемассовой температуры листов при охлаждении от 800 до 500°С

I - УКО стана 5000, экспериментальные данные;
II - область возможного расширения диапазона скорости охлаждения в УКО стана 5000;
 система MACS, в т.ч.:
 1 - - ACC;
 2 - - DQD;
 3 - - устройство OLAC⁴;
 4 - - максимально возможная теоретически.

⁴ Application of on-line Accelerated Cooling (OLAC) to Steel Plate / K. Tsukada, K. Matsumoto, K. Hirabe, K. Takeshige // Iron and Steelmaker. 1982. v. 9. N 7. P. 21...28.

Таким образом, при включении в работу секций зон различной охлаждающей способности раздельно и в различных сочетаниях работающих и неработающих секций можно обеспечить в одном агрегате охлаждение со скоростями изменения среднемассовой температуры от минимально возможных при струйном водяном охлаждении до близких к предельным теоретически возможным. Для сравнения отметим, что для реализации значительно более узкого диапазона регулирования среднемассовых скоростей охлаждения в технологическом потоке лучших зарубежных толстолистовых станов применяются два независимо используемых агрегата - устройство регулируемого охлаждения и роликовая закалочная машина.

Совместно с листопрокатным цехом № 3 ЧерМК-ОАО «Северсталь» проведено комплексное исследование равномерности охлаждения по площади штрипса для труб большого диаметра.

Установлено (таблица 6), что плоскофакельные форсунки конструкции ВНИИМТ обеспечивают высокую равномерность распределения воды по ширине листа, особенно на рабочих расстояниях 395...645 мм от форсунок до верхней поверхности раската. Для форсунок фирмы «Spraying Systems», которые по решению цеха были установлены на 6...8 секциях, величина среднеквадратичных отклонений в 1,6 раза больше.

Таблица 6 Результаты статистической обработки исследований равномерности распределения расходов воды по ширине секций УКО

Расстояние от форсунок до измерительного устройства, мм	Среднее значение расхода воды, м ³ /час среднеквадратичное отклонение значений σ								$\frac{\sigma_{\text{№ 6, 7, 8}}}{\sigma_{\text{№ 4, 5}}}$
	Форсунки ВНИИМТ			Среднее σ для секций № 4, 5*	Форсунки "Spraying Systems"			Среднее σ для Секций № 6, 7, 8	
	Номер секции				Номер секции				
	3	4	5		6	7	8		
395	$\frac{3,11}{0,12}$	$\frac{2,52}{0,13}$	$\frac{2,73}{0,11}$	0,12	$\frac{2,86}{0,15}$	$\frac{2,18}{0,19}$	$\frac{3,29}{0,24}$	0,19	1,6
645	$\frac{3,09}{0,09}$	$\frac{2,44}{0,13}$	$\frac{2,86}{0,11}$	0,12	$\frac{2,85}{0,18}$	$\frac{2,36}{0,21}$	$\frac{2,99}{0,22}$	0,20	1,7
995		$\frac{1,89}{0,18}$	$\frac{2,58}{0,12}$	0,15				0,18	1,2
1015							$\frac{2,63}{0,18}$		
1085	$\frac{3,11}{0,09}$				$\frac{3,07}{0,16}$	$\frac{2,24}{0,19}$			

*) Данные по секции № 3 в усреднении не использованы ввиду другой схемы расположения форсунок, обусловленной конфигурацией коллекторов данной секции.

Для анализа разброса механических свойств были сопоставлены два лис-

та, прокатанных по одной технологии, и с последующим охлаждением естественным путём на воздухе или ускоренно в УКО. Каждый лист был разрезан по определённой схеме на 201 образец.

Статистический анализ (таблица 7) показал, что разброс механических свойств по ширине листа, ускоренно охлаждённого в УКО, в 1,2...2 раза ниже, чем у горячекатаного листа, охлаждённого на воздухе. По равномерности распределения прочностных свойств штрипс, термоупрочнённый в УКО стана 5000, не уступает зарубежным аналогам, а так же соответствует требованиям API (институт нефти Америки) – мирового законодателя в области стандартов на трубную сталь, согласно которым разброс значений временного сопротивления не должен превышать 50 МПа.

Таблица 7 Среднеквадратичное отклонение прочностных свойств по площади раската после термоупрочнения в УКО в сравнении с охлаждением на воздухе

Местонахождение проб	σ_T , МПа		σ_B , МПа	
	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение
при охлаждении в УКО				
по ширине раската				
- начало раската	509	7,41	575	6,23
- середина раската	500	6,35	567	5,89
- конец раската	504	7,54	572	7,25
по длине раската	540	8,67	603	7,66
при охлаждении на воздухе				
по ширине раската	461	12,78	521	10,58
по длине раската	492	12,48	546	11,02

Разработаны принципы управления процессом охлаждения и система АСУ ТП устройства контролируемого охлаждения, позволяющая как управлять процессом в режиме реального времени, так и моделировать и сразу реализовывать новые технологические режимы охлаждения. Установлено, что разработанная во ОАО «ВНИИМТ» математическая модель, адаптированная к данному устройству, позволяет с достаточно высокой точностью (до 3%) осуществлять оперативное управление процессом термоупрочнения и высокую точность обеспечения требований технологических карт.

Выявлены особенности, учет которых обязателен при разработке АСУ охлаждающих устройств для термоупрочнения проката:

- особенности процессов регулирования расходов воды в многоконтурной системе с учетом инерционности измерительных приборов;
- определение мест установки пирометров после устройства ускоренного охлаждения, учитывающее процессы внутреннего теплообмена при выравнивании температуры по сечению проката;
- необходимость при разработке программного обеспечения АСУ уст-

ройства ускоренного охлаждения обращать особое внимание на статистическую обработку массивов текущих значений температуры проката, позволяющую достоверно определить значение температуры поверхности и построить распределение температуры по длине раската.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Сформулированы требования к устройствам регулируемого (ускоренного контролируемого) охлаждения толстолистового проката. Показано, что одним из важнейших параметров, характеризующих технологические возможности охлаждающего устройства, является диапазон регулирования среднемассовой скорости охлаждения для листов различной толщины.

2. Определены с применением численного моделирования параметры и разработана конструкция устройств ускоренного охлаждения после нормализационных печей стана 3600 МК «Азовсталь».

3. Разработана конструкция коллекторов плоскофакельного охлаждения, обеспечивающих равномерное распределение охладителя (воды) по всей поверхности широкого листа при работе на оборотной воде прокатного цеха (высокая загрязненность, давление в интервале 0,02...0,3 МПа), определен расходный коэффициент μ для коллекторов данной конструкции.

4. Введены в промышленную эксплуатацию устройства ускоренного охлаждения после нормализационных печей стана 3600 МК «Азовсталь» и устройство контролируемого охлаждения в потоке стана 5000 ЧерМК-ОАО «Северсталь». Определены фактические теплофизические параметры ($q=f(W)$) вышеуказанных охлаждающих устройств, на основании которых проведена адаптация математической модели для каждого устройства. Построена номограмма определения расхода воды на секции УКО по заданным температуре конца охлаждения и скорости охлаждения. Разработаны режимы работы устройств для термоупрочнения толстолистового проката различного марочного и размерного сортамента.

5. Установлено, что по возможности регулирования среднемассовой скорости охлаждения каждое из разработанных устройств обеспечивает реализацию различных технологических процессов (термоупрочнение, закалка с самоотпуском и без него, контролируемая прокатка и т. п.), в то время как за рубежом для реализации указанного комплекса технологических процессов в линии стана устанавливаются два агрегата – устройство регулируемого охлаждения и роликовая закалочная машина.

6. По результатам комплексного исследования установлено, что плоскофакельные форсунки ВНИИМТ обеспечивают равномерность распределения воды по ширине листа в 1,6 раза лучше, чем форсунки Quick FlatJet фирмы «Spraying Systems». Равномерность распределения механических свойств по площади листа, термоупрочнённого в УКО стана 5000, не уступает результатам, достигнутым на зарубежных устройствах регулируемого охлаждения.

7. Проведён анализ работы АСУ устройства контролируемого охлаждения в потоке стана 5000, позволяющей моделировать и сразу реализовывать но-

вые технологические режимы охлаждения широкого толстолистого проката. Выявлены особенности, учет которых обязателен при разработке АСУ охлаждающих устройств для термоупрочнения проката. Установлено, что разработанная во ОАО «ВНИИМТ» математическая модель процесса охлаждения, адаптированная к устройству контролируемого охлаждения, позволяет с достаточно высокой точностью (до 3%) осуществлять оперативное управление процессом термоупрочнения и обеспечивать высокую точность обеспечения требований стандартов на готовый прокат.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

– В рекомендованных ВАК изданиях:

1. Липунов Ю.И. Устройства ускоренного охлаждения металлопроката / Ю.И. Липунов, К. Ю. Эйсмонтт [и др.]. // *Металлург*. 1989. № 5. С.37...38.
2. Эйсмонтт К.Ю. Выбор параметров устройств термоупрочнения толстого листа после нормализационного нагрева на основе расчетного анализа процесса охлаждения / К.Ю. Эйсмонтт, Ю.И. Липунов, А.С. Телегин // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1989. № 6. С. 154...155.
3. Липунов Ю.И. Освоение устройств контролируемого охлаждения листа в потоке стана 5000 ОАО «Северсталь» / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонтт, Г.Г. Траянов [и др.] // *Сталь*. 2005. № 3. С. 56...61.
4. Эйсмонтт К.Ю., Автоматизированная система управления устройством контролируемого охлаждения на стане 5000 / К.Ю. Эйсмонтт, Ю.И. Липунов, Д.В. Завгороднев, [и др.] // *Сталь*. 2005. № 3. С. 61...65.
5. Матросов М.Ю. Использование ускоренного охлаждения для повышения механических и технологических свойств толстолистого проката для изготовления газопроводных труб большого диаметра / М.Ю. Матросов, Л.И. Эфрон, ... К.Ю. Эйсмонтт // *Металлург*. 2005. № 6. С. 49...54.
6. Эйсмонтт К.Ю. Исследование процессов охлаждения при термоупрочнении арматуры / К.Ю. Эйсмонтт, Ю.И. Липунов, Ю.Г. Ярошенко [и др.] // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 2007. № 2. С. 54...57.
7. Липунов Ю.И. Разработка систем автоматизированного управления технологическим процессом термического упрочнения проката в потоке стана / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонтт [и др.] // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 2009. № 12. С. 68...72.
8. Липунов Ю.И. Разработка систем регулируемого охлаждения и технологий термоупрочнения / Ю.И. Липунов, Г.Г. Траянов, К.Ю. Эйсмонтт // *Сталь*. 2010. № 3. С. 86...89.

– В других статьях:

1. Липунов Ю.И. Разработка и освоение устройств ускоренного охлаждения толстых стальных листов после нормализации / Ю.И. Липунов, К. Ю. Эйсмонтт, Л.С. Тихонюк // *Материалы семинара «Современное оборудование и технология термической и химико-термической обработки металлических материалов»*. М.: МДНТП, 1986. С. 122...126.

2. Липунов Ю.И. Изучение закономерностей охлаждения толстых стальных листов в закалочных баках с барботажем / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт [и др.] // Исследование тепловых процессов и агрегатов основных переделов черной металлургии. Тематический сборник научных трудов ВНИИМТ, М.: Металлургия, 1987. С. 90...95.

3. Липунов Ю.И. Теплотехнические основы ускоренного охлаждения проката и разработка охлаждающих устройств / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт [и др.] // Теплотехника металлургических процессов и агрегатов. Тематический сборник научных трудов ВНИИМТ. М.: Металлургия, 1990. С. 68...72.

4. Липунов Ю.И. Устройство контролируемого охлаждения (УКО) толстолистного проката в потоке стана «5000» ОАО «НТМК» / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт // Труды II научно-техн. конференции «Штрипс и трубы – обеспечение качества». Нижний Тагил: изд-во ОАО «НТМК», 2002. С. 101...104.

5. Эйсмонт К.Ю. Методика теплотехнического расчета параметров устройств контролируемого охлаждения толстого листа / Эйсмонт К.Ю., Липунов Ю.И., Ярошенко Ю.Г. // Теплофизика технологических процессов. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Рыбинск: РГАТА, 2005. С. 135...136.

– Патентные документы:

1. Устройство для охлаждения проката: а. с. № 1405915 СССР: МКИ⁴ В 21 В 45/02 / Л.М. Замараев, Н.М. Пермяков, К.Ю. Эйсмонт, В.И. Карлов (СССР). - № 4162189/23-02; заявл – 15.12.1986; опубл. 30.06.88, Бюл. N 24. - 3 с.: ил. 2.

2. Устройство для регулируемого охлаждения проката: пат. 2409436 Рос. Федерация: МПК⁸ В 21 В 45/02 / Пшенин С.А., Клопов В.И., Эйсмонт К.Ю.; заявитель и патентообладатель ОАО «Колпинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения» (ОАО «КО ВНИИМЕТМАШ»). - № 2009126897/02; заявл. 13.07.2009, опубл. 20.01.2011, Бюл. N 2. - 3 с.: ил. 9.